

“Kinking” de grietas transversales de interfase entre fibra y matriz de materiales compuestos fibrosos

E. Correa, F. París, V. Mantič

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Universidad de Sevilla, España

RESUMEN

Los materiales compuestos fibrosos pueden fallar ante cargas transversales a la dirección de la fibra. Esta rotura se conoce como fallo de la matriz o fallo entre fibras y se caracteriza por la aparición de grietas en la interfase de las fibras y la matriz, que posteriormente coalescen dando lugar a macrofisuras en el material compuesto. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un modelo, empleando el Método de los Elementos de Contorno, con el fin de obtener información que permita explicar el mecanismo de aparición y propagación del daño antes mencionado. Para ello se analiza la configuración consistente en una celda de matriz en la que se encuentra embebida una única fibra que presenta un despegue parcial en la interfase con la matriz. Los resultados obtenidos muestran que ante carga uniaxial transversal a la dirección de las fibras los fenómenos más importantes aparecen para ángulos de despegue en la interfase fibra-matriz que se encuentran en el intervalo 60° - 70° . Después de este intervalo el crecimiento de la grieta a lo largo de la interfase se produce en Modo II y tiene carácter estable, mientras que en el periodo anterior de crecimiento de la grieta su progresión se produce en modo mixto (dominado por el Modo II) y con carácter plausiblemente inestable. En este intervalo de 60° - 70° del ángulo de despegue la dirección de máxima tensión circunferencial en el entorno del fondo de grieta es aproximadamente perpendicular a la carga aplicada. Puede concluirse también que, si una grieta correspondiente a un despegue en el intervalo mencionado abandona la interfase y penetra en la matriz, en esta situación: a) el crecimiento de la grieta a través de la matriz es inestable y en Modo I puro, b) el valor del índice de liberación de energía alcanza su máximo (en comparación con otros ángulos de despegue), y c) la energía liberada es mayor que la liberada en el caso de seguir la grieta propagándose por la interfase. Todo esto sugiere que es en este intervalo del ángulo de despegue donde se dan las condiciones más apropiadas para que se produzca el “kinking” de una grieta de interfase.

1. INTRODUCCIÓN

El mecanismo de fallo conocido como fallo de la matriz o fallo entre fibras puede describirse, particularmente ante cargas de tracción, por la aparición de grietas de interfase

entre la fibra y la matriz que ante ciertas condiciones cambian bruscamente de dirección, abandonando la interfase y penetrando en la matriz, de forma que la coalescencia de estas grietas de interfase da lugar a una macrofisura, ver Figura 1, que está asociada al fallo de la lámina bajo consideración. En este trabajo se empleará el término “kinking” para hacer referencia al cambio brusco en la dirección de propagación de las grietas de interfase.

El objetivo de este trabajo es estudiar las condiciones ante las que se generan las grietas de interfase y su “kinking” posterior. Para ello se desarrolla un modelo de Elementos de Contorno de una única fibra que presenta un despegue en la interfase. El modelo permite la separación de los labios de la grieta así como el contacto entre los mismos. De acuerdo al enfoque energético de la Mecánica de la Fractura se emplea el índice de liberación de energía como parámetro de estudio.

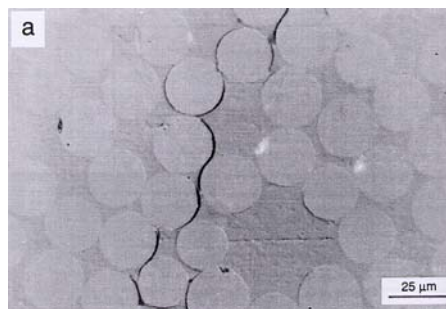


Fig. 1 – Vista de la macrofisura, Gamstedt (1997)

2. EL MODELO

El análisis numérico se ha llevado a cabo con el Método de los Elementos de Contorno, París y Cañas (1997). El modelo básico, empleado en los apartados 3 y 4, se muestra en la Figura 2 y representa el caso de una grieta que crece a través de la interfase, configuración ya analizada por París et al (1996). El modelo permite el desarrollo de una zona de contacto (θ_d - θ_s en la Figura 2) entre las superficies despegadas de la fibra y de la matriz. Todos los contornos han sido modelados con elementos continuos lineales.

Para caracterizar el problema desde el punto de vista de la Mecánica de la Fractura se empleará el índice de liberación de energía cuando sea necesario. La expresión utilizada, para una grieta que se propaga desde un cierto ángulo α hasta $\alpha+\delta$ ($\delta \ll \alpha$), es:

$$G_\delta(\alpha) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta} \int_{\alpha}^{\alpha+\delta} \{(\sigma_{rr})_{\alpha}(u_r)_{\alpha+\delta} + (\sigma_{r\theta})_{\alpha}(u_{\theta})_{\alpha+\delta}\} d\theta \quad (1)$$

Donde, σ_{rr} : tensión radial en la interfase, Pa

$\sigma_{r\theta}$: tensión tangencial en la interfase, Pa

u_r : desplazamiento radial relativo de los labios de la grieta, m

u_{θ} : desplazamiento tangencial relativo de los labios de la grieta, m

Cuando se quiere modelar la situación en la que el “kinking” se ha producido, apartado 5, el modelo básico se altera, Figura 3, de forma que quede representado el caso de una grieta que primero crece a lo largo de la interfase y luego progresa a través de la matriz. En la

Figura 3 la parte correspondiente a la grieta de interfase se ha representado completamente separada. Esto ocurre cuando se comienza desde una cierta longitud de la grieta incipiente en la matriz. Cuando la grieta incipiente en la matriz es muy pequeña todavía existe contacto entre los labios de la parte de la grieta en la interfase, hecho que el modelo es capaz de detectar.

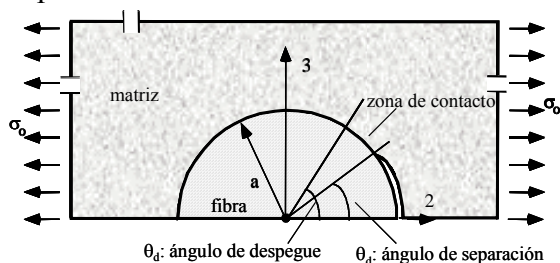


Fig. 2 – Modelo básico

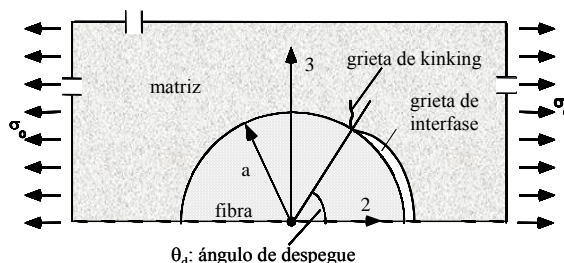


Fig. 3 – Modelo con grieta de “kinking”

Cuando se calcula el índice de liberación de energía para la grieta incipiente en la matriz, apartado 5, se utiliza la misma aproximación descrita para el modelo básico, aunque transformando la Ecuación (1) para que se ajuste a la forma de la grieta incipiente en la matriz, que está modelada como una línea recta.

Los resultados han sido obtenidos para un sistema fibra de vidrio-matriz epoxy con las siguientes propiedades:

ν^f : Coeficiente de Poisson de la fibra=0.22

ν^m : Coeficiente de Poisson de la matriz=0.33

G^f : Módulo de cizalladura de la fibra= 29×10^9 Pa

G^m : Módulo de cizalladura de la matriz= 1.05×10^9 Pa

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PREVIOS

El “kinking” es considerado aquí como un fenómeno que tiene lugar una vez que la grieta ha crecido una cierta cantidad a través de la interfase. Por lo tanto, parece interesante estudiar primero la evolución de la grieta a lo largo de la interfase como un paso previo antes de llevar a cabo el estudio del “kinking”.

París et al (2002) han estudiado el caso de una grieta de interfase que evoluciona ante cargas bidireccionales. Los resultados contenidos en dicho trabajo que afectan a la presente discusión, grieta de interfase ante tracción transversal a la dirección de las fibras, son revisados a continuación.

En la Figura 4 se presentan los resultados del índice de liberación de energía de una grieta que progresa a través de la interfase, cuya longitud es medida por el ángulo de despegue, siendo éste en realidad la mitad del verdadero ángulo de despegue ya que el modelo considerado, ver Figuras 2 y 3, presenta simetría horizontal. Los resultados que se

muestran en este apartado y en todo el trabajo se corresponden al caso sin fricción cuando existe zona de contacto. De la Figura 4 puede observarse que el índice de liberación de energía presenta un máximo alrededor de los 60° - 70° coincidiendo con la aparición de una zona de contacto de tamaño finito, París et al (1996). Aún así el problema es más complicado debido a la presencia de modo mixto durante el intervalo de crecimiento inestable mencionado. Asimismo puede observarse cómo G_{II} domina frente a G_I a lo largo de todo el intervalo de despegues considerado (para ángulos mayores de 30° aunque el intervalo completo de ángulo de despegues se incluye en la Figura).

La forma de la curva sugiere la presencia de crecimiento inestable hasta el máximo de la curva, seguido de crecimiento estable para ángulos mayores. El cambio en el carácter del crecimiento de la grieta de inestable a estable en el entorno de los 60° del ángulo de despegue hace que esta zona sea favorable para la aparición de otro mecanismo de fallo. Esta idea además se ve apoyada por la evidencia experimental que muestra que la situación dominante es que el “kinking” se produzca alrededor de los 60° - 70° , ver Figura 1.

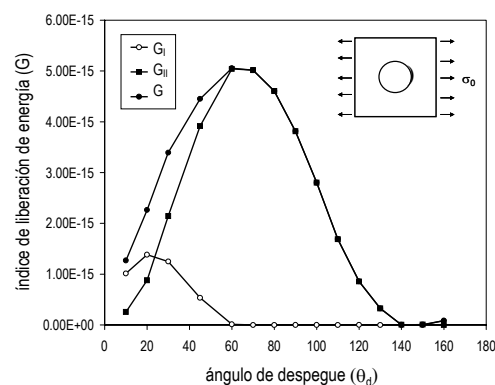


Fig. 4 – G , G_I y G_{II} de la grieta de interfase

4. ESTADO TENSIONAL EN EL ENTORNO DEL FONDO DE GRIETA. SOLUCIÓN NUMÉRICA EMPLEANDO EL MEC.

La primera cuestión a aclarar utilizando el MEC es la búsqueda de la dirección preferente de “kinking”. En este sentido podría pensarse que, si la grieta que crece a lo largo de la interfase cambiara su dirección de crecimiento para penetrar en la matriz, la dirección elegida podría ser aquella en la que la tensión circunferencial (σ_θ) es máxima, ver Figura 5. Esta suposición está basada en el hecho de que el Modo I es, en general, la causa principal de propagación de las grietas y es precisamente en la dirección de máxima tensión circunferencial (σ_θ^{\max}) donde el efecto de este modo es más dominante.

Por ello, lo primero que se va a llevar a cabo es la determinación de la dirección de σ_θ^{\max} en el entorno del fondo de grieta correspondiente a un despegue para el cual se espera que se produzca el “kinking” de la grieta. Seguidamente este mismo estudio se extenderá a un rango de despegues entre la fibra y la matriz más amplio. Por lo tanto, el estudio numérico primero se realiza para un despegue de 70° , un ángulo en cuyo entorno el carácter de la propagación σ_θ

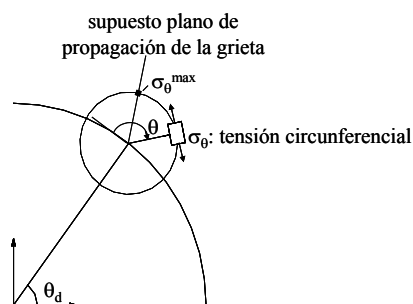


Fig. 5 – Tensión circunferencial, σ_θ

de la grieta pasa a ser estable, como se explicó en el apartado 3. Debe notarse que, de acuerdo a la Figura 1, el “kinking” normalmente tiene lugar en la región que rodea a este ángulo y su dirección de comienzo esperada coincide con la dirección normal a la carga. En el contexto definido, el valor de σ_θ a lo largo de una circunferencia centrada en el fondo de grieta se calcula para diferentes ángulos de esta circunferencia, Figura 6, así como para diferentes radios de dicha circunferencia en el rango ($3.45052 \times 10^{-11} \text{ m}$, $1.16911 \times 10^{-8} \text{ m}$).

De los resultados mostrados en la Figura 6 es importante destacar que el máximo de la tensión circunferencial aparece, en el rango completo de radios, para un valor de la coordenada circunferencial alrededor de los 70° . Puede verse claramente que esta dirección se corresponde con la normal a la carga, y, además, que este resultado es independiente del radio en el rango estudiado.

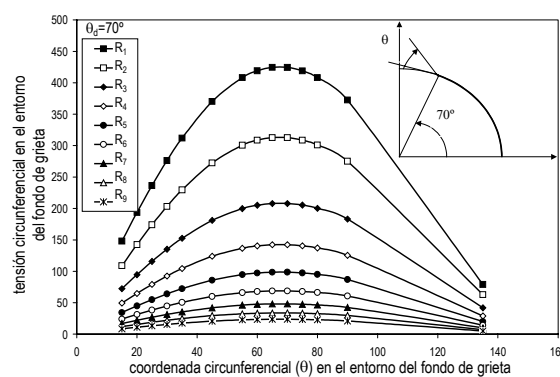


Fig. 6 – σ_θ para $\theta_d=70^\circ$

Por lo tanto esto lleva a pensar que, si el “kinking” se produjera, no sólo comenzaría en la dirección normal a la carga sino que, una vez propagándose por la matriz, la grieta mantendría esta dirección al menos hasta una distancia equivalente al mayor de los radios considerados, R_9 , mientras no existiera algún otro factor que perturbara su propagación.

Extendiendo el estudio llevado a cabo para el caso de 70° a un rango más amplio de despegues, aunque sólo para el radio R_1 , toda vez que se ha demostrado que el radio no tiene influencia en la dirección de máxima tensión circunferencial, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 7. En dicha Figura puede observarse perfectamente que la coordenada circunferencial correspondiente a σ_θ^{\max} varía en un rango estrecho para los despegues

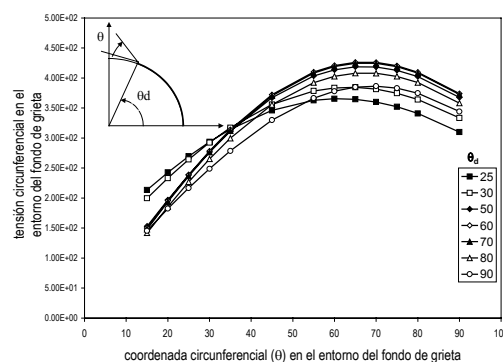


Fig. 7 – σ_θ para el rango $\theta_d=30^\circ-90^\circ$

considerados, lo que significa que la coordenada circunferencial para la que σ_θ alcanza su máximo permanece aproximadamente constante. Además también puede observarse en la Figura que para cada despegue hay un intervalo considerable de valores de la coordenada circunferencial en el que los valores de σ_θ se encuentran bastante próximos al máximo, lo que puede llevar a pensar que los valores de σ_θ son insuficientes para predecir la dirección de “kinking” para ciertos despegues.

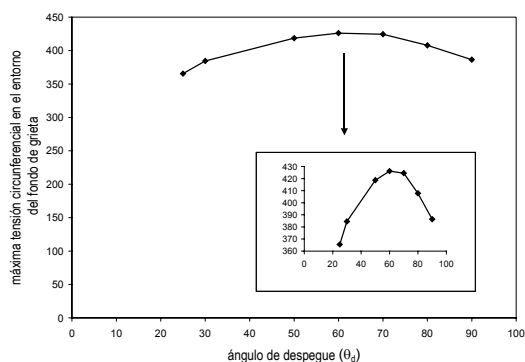


Fig. 9 – σ_{θ}^{\max} para el rango $\theta_d=30^\circ-90^\circ$

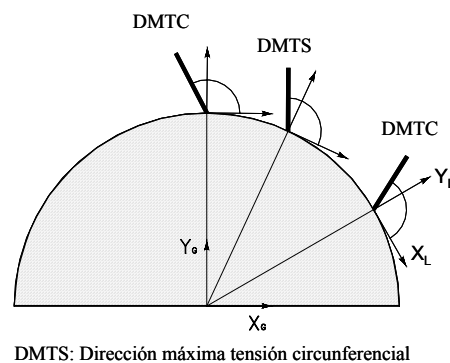


Fig. 8 – Dirección de σ_{θ}^{\max}

Como resumen de los resultados presentados se puede decir que la dirección de σ_{θ}^{\max} permanece constante respecto a la dirección tangente a la fibra en el fondo de grieta, pero viaja con la grieta cuando cambia de posición en la interfase, como se representa en la Figura 8. Finalmente, algo interesante a destacar en los resultados es que σ_{θ} alcanza su máximo cuando la longitud de la grieta en la interfase se corresponde con valores del despegue entre 60° y 70° , como puede observarse en la Figura 9, donde se representa σ_{θ}^{\max} para cada despegue. Además, de acuerdo con resultados previos, el valor σ_{θ}^{\max} aparece en la dirección normal a la carga. Teniendo en mente lo acabado de exponer parece lógico pensar que el valor del despegue para el que se produce el “kinking”, en la dirección normal a la carga, es de $60^\circ-70^\circ$, entorno para el que se produce σ_{θ}^{\max} .

5. ÍNDICE DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA DE LA GRIETA INCIPIENTE EN LA MATRIZ

En el apartado anterior se ha analizado la dirección de máxima tensión circunferencial en el entorno del fondo de la grieta de interfase a fin de determinar la dirección en la cual la grieta supuestamente penetraría en la matriz, siempre que se dieran las causas apropiadas para que este hecho se produjera, de acuerdo con el criterio de máxima tensión circunferencial.

En este apartado se evalúa la posibilidad de que una grieta que progresa por la interfase penetre en la matriz y continúe su crecimiento a través de ella siguiendo la dirección preferente de “kinking” determinada en el apartado anterior. Para ello se estudia la evolución del índice de liberación de energía de la grieta que progresa por la matriz.

En primer lugar se estudia la energía liberada por la grieta que penetra en la matriz, en la dirección normal a la carga, para un despegue de 70° . Los resultados se muestran en la Figura 10, donde se representan los valores del índice de liberación de energía, así como de sus componentes asociadas, frente a la longitud de la grieta incipiente en la matriz.

Llama la atención la importante contribución del Modo I a la energía total, mientras que el Modo II es casi inexistente. Este resultado era esperable dada la posición completamente transversal de la dirección de la grieta incipiente en la matriz respecto a la carga. En lo que respecta a la evolución de la energía liberada puede observarse que ésta es creciente con la longitud de la grieta. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el Modo I domina completamente, se puede concluir que se trata de una evolución inestable. En consecuencia, una vez que la grieta ha cambiado de dirección para propagarse por la matriz no necesitará de aumento adicional de la carga para continuar creciendo.

También puede observarse una cierta tendencia asintótica en el origen de la evolución de energía liberada. Parece claro de la Figura que el índice de liberación de energía no se anula cuando la longitud de la grieta incipiente en la matriz es muy pequeña. Por el contrario, G

tiende en el origen hacia un valor finito. Esta situación parece coherente con el hecho de que la longitud total de la grieta no es cero cuando lo es el tamaño de la grieta en la matriz. Además, y como se verá más tarde, este valor finito del índice de liberación de energía de la grieta incipiente en la matriz no tiene que coincidir necesariamente con el valor del índice de liberación de energía de la grieta de interfase.

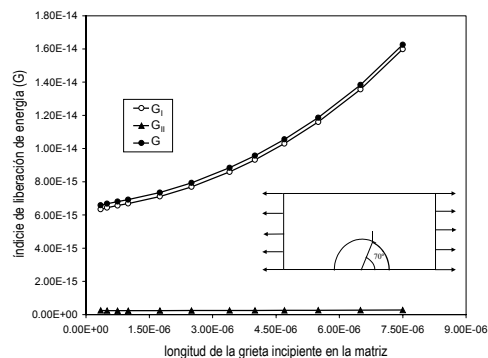


Fig. 10 – G para la grieta de “kinking”

Una vez estudiado el caso del despegue de 70° se investiga el comportamiento de los diferentes despegues a fin de evaluar la evolución de G de la grieta incipiente para distintos despegues. En todos los casos se ha observado el carácter creciente de G con la longitud de la grieta incipiente en la matriz. Los mínimos de estas curvas, es decir, los posibles valores asintóticos de la energía liberada por las grietas de “kinking” se representan en la Figura 11 frente al ángulo de despegue, de forma conjunta

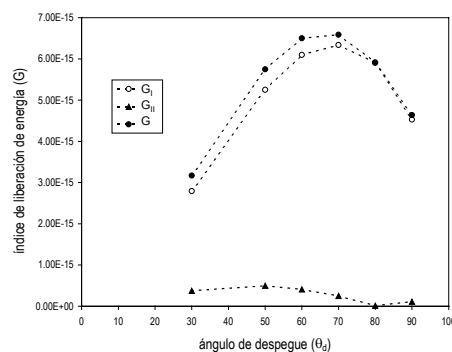


Fig. 11 – G de “kinking” para el rango $\theta_d=30^\circ-90^\circ$

con sus componentes. La tendencia mostrada en la Figura 11 favorece la idea de que, si el “kinking” se produjera, ocurriría con mayor probabilidad para un despegue entre 60° y 70° .

Con el fin de tener más información sobre la posibilidad de la aparición del “kinking” es necesario (aunque no suficiente para concluir que el “kinking” aparezca ya que depende de los valores de G_c de la interfase fibra-matriz) comparar con la evolución de la energía para la grieta de interfase. La Figura 12 muestra esta comparación, donde también se incluyen los valores de G para el caso en el que la grieta incipiente en la matriz sigue la dirección de σ_{θ}^{\max} .

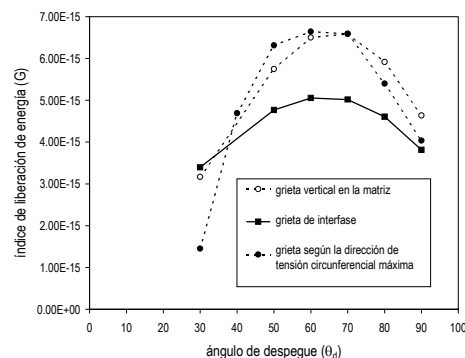


Fig. 12 – Comparación de G

En primer lugar hay que señalar que los dos casos de grietas incipientes en la matriz muestran una evolución coherente entre ellas. Ambas coinciden para el caso de 70° , donde la dirección de máxima tensión circunferencial es normal a la carga. Las mayores discrepancias aparecen para ángulos pequeños donde, de acuerdo a la Figura 12, la dirección de máxima tensión circunferencial se encuentra bastante desviada de la dirección normal a la carga, de tal forma que el efecto del Modo I se hace menos patente. En lo que respecta a la comparación del índice de liberación de energía de la grieta incipiente en la matriz frente al de la grieta de interfase, se observa cómo claramente la energía liberada por la grieta incipiente en la matriz presenta valores bastante superiores a los de la grieta de interfase.

6. CONCLUSIONES

Los estudios micromecánicos realizados han permitido generar información acerca del “kinking” de las grietas de interfase ante carga transversal a la dirección de la fibra. Concretamente, las conclusiones obtenidas pueden resumirse en los siguientes puntos:

- En el crecimiento de la grieta a través de la interfase existe una zona, entre 60° y 70° , donde la evolución de la energía presenta un cambio de inestable a estable convirtiéndose, por tanto, en una zona propicia a cambios en el mecanismo de fallo, en este caso a que tenga lugar el “kinking” de la grieta de interfase.
- Estudiando la dirección preferente de “kinking”, en base a σ_{θ}^{\max} en el entorno de la grieta de interfase, se ha obtenido que la dirección de σ_{θ}^{\max} se mantiene constante respecto a un sistema de referencia local que se encuentre en el fondo de grieta y que viaje con el ángulo de despegue a través de la interfase. Esto hace que en el entorno de 60° - 70° dicha dirección de σ_{θ}^{\max} coincide con la dirección normal a la carga.
- En lo que se refiere a la evolución de la grieta una vez que el “kinking” se ha producido se ha encontrado que los máximos valores de índice de liberación de energía se producen para ángulos de despegue entre 60° - 70° con grieta de “kinking” vertical, siendo la evolución a través de la matriz inestable. Finalmente, cuando se compara este

valor de la energía de la grieta que progresa a través de la matriz con el que liberaría si continuara haciéndolo a través de la interfase, se observa que el primero es mayor (del orden de un 40%) respecto al segundo.

Todo esto hace suponer que en el intervalo de 60°-70° se producen las condiciones adecuadas para que la grieta de interfase cambie bruscamente de dirección y continúe creciendo a través de la matriz. Estas conclusiones se encuentran limitadas, lógicamente, por el papel de dos factores importantes: los valores relativos de G_c de la interfase y la matriz y el carácter simplificado del modelo empleado respecto al material compuesto real que se quiere estudiar.

REFERENCIAS

- GAMSTEDT, K. (1997). Fatigue Damage Mechanism in Polymer Matrix Composites. Doctoral Thesis, *Lulea University of Technology*.
- PARÍS, F., DEL CAÑO, J. C. y VARNA, J. (1996). The fiber-matrix interface crack. A numerical analysis using Boundary Elements. *Int. J. of Fracture*, 82(1), pp. 11-29.
- PARÍS, F. y CAÑAS, J. (1997). *Boundary Element Method. Fundamentals and Applications*. Oxford, OUP.
- PARÍS, F., CORREA, E. y CAÑAS, J. (2002). Micromechanical view of failure of the matrix in fibrous composite materials. *Composites Science and Technology*, 63(5), pp. 1041-1052.